МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.771.014 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-3-289-299

Экспериментальное исследование энергосиловых параметров совмещенного процесса «прокатка — равноканальное угловое прессование»[*]

А. Б. Найзабеков[1], С. Н. Лежнев[2], Т. А. Койнов[3], Е. А. Панин[4]**

[1,2] Рудненский индустриальный институт, г. Рудный, Республика Казахстан
[3] Университет химической технологии и металлургии, г. София, Республика Болгария
[4] Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Республика Казахстан

Experimental study on power parameters of "rolling - ECA-pressing" combined process[***]

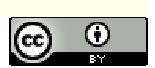
A. B. Naizabekov[1], S. N. Lezhnev[2], T. A. Koinov[3], E. A. Panin[4]**
[1,2] Rudny Industrial Institute, Rudny, Republic of Kazakhstan
[3] University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, Republic of Bulgaria
[4] Karaganda State Industrial University, Temirtau, Republic of Kazakhstan

Введение. Статья посвящена исследованию энергосиловых параметров совмещенного процесса «прокатка — равноканальное угловое прессование (РКУ)». Цель работы — определение возникающих усилий прокатки и прессования при деформировании совмещенным способом.
Материалы и методы. Был проведен прочностной расчет матрицы и эксперимент по деформированию образцов из алюминия марки AISI 6063. В ходе опытов значения усилий фиксировались с помощью тензометрической станции.
Результаты исследования. Результаты прочностного анализа позволяют утверждать, что данная конструкция матрицы пригодна для создания экспериментальной установки совмещенного процесса «прокатка — РКУ-прессование», поскольку рассчитанного запаса прочности вполне достаточно для реализации прессования на предельных условиях. Усилия прокатки на всех этапах деформирования превышают соответствующие усилия прессования, что является необходимым условием совмещенного процесса.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании экспериментальных установок, реализующих исследуемый совмещенный процесс. При этом тензометрический метод исследования прочностных характеристик пригоден и при использовании калиброванных валков.

Ключевые слова: совмещенный процесс, прокатка, равноканальное угловое прессование, усилие, прочностной анализ, тензометрия.

Introduction. Power parameters of the "rolling − equal-channel angular pressing" (ECA) combined process are studied. The work objective is to determine forces of rolling and pressing in the deformation by the combined method.
Materials and Methods. The die strength calculation and the experiment on deformation of AISI 6063 aluminum samples were carried out. During the experiment, the force values were recorded using a strain-gauge station.
Research Results. The strength analysis results show that this die design is suitable for creating an experimental stand of the "rolling − ECA-pressing" combined process, since the calculated safety margin is sufficient to implement the pressing under extreme conditions. The rolling forces at all stages of the deformation exceed the corresponding pressing forces, which is a necessary condition for the combined process.
Discussion and Conclusions. The obtained results can be used in the design of experimental stands that implement the investigated combined process. Herewith, the given strain-gauge method for studying strength characteristics is suitable for the case of calibrated rolls.

Keywords: combined process, rolling, equal channel angular pressing, force, strength analysis, tensometry.



[*] Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**] E-mail: naizabekov57@mail.ru, sergey_legnev@mail.ru, toni309@koinov.com, cooper802@mail.ru
[***] The research is done within the frame of the independent R&D.

Образец для цитирования: Экспериментальное исследование энергосиловых параметров совмещенного процесса «прокатка − равноканальное угловое прессование» / А. Б. Найзабеков [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 3. — С. 289−299. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-3-289-299

For citation: A.B. Naizabekov, et al. Experimental study on power parameters of "rolling - ECA-pressing" combined process. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.3, pp. 289−299. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-3-289-299

Введение. Повышение качества деформируемого металла является одной из главных задач при создании нового или совершенствовании известного технологического процесса обработки металла давлением (ОМД). Вне зависимости от того, к какому типу (прокатному или кузнечному) относится разрабатываемый процесс, рекомендуется применять схему деформирования, реализующую чистый сдвиг. В этом случае затрачивается минимальное количество энергии на деформацию металла, достигается максимальная и однородная проработка заготовки по сечению, обеспечивается закрытие внутренних дефектов.

За последние два десятилетия активно разрабатывались способы обработки давлением, позволяющие получать заготовки с ультрамелкозернистой структурой. Как показал их анализ, они основаны на принципах реализации сдвиговых или знакопеременных деформаций. Отдельно стоит упомянуть процессы, представляющие собой комбинацию указанных принципов. Такие процессы позволяют реализовать особый вид обработки давлением, который называется «интенсивная пластическая деформация» (ИПД). ИПД реализуют такие методы, как кручение под высоким давлением [1–3], равноканальное угловое (РКУ) прессование [4–8], винтовая экструзия [9–12] и другие. Особого внимания заслуживает ступенчатая РКУ-матрица (или РКУ-матрица с параллельными каналами) [13–14]. Она позволяет реализовать сдвиговую деформацию при прохождении заготовки через ее каналы и одновременно с этим два знакопеременных очага деформации, при условии сонаправленности входного и выходного каналов. В сравнении с обычной угловой матрицей ступенчатая РКУ-матрица является энергосберегающей, поскольку позволяет реализовать большую степень деформации за один проход при одинаковом усилии.

Рассмотренные выше способы ОМД относятся к дискретным способам прессования. Эти технологии производства пресс-изделий имеют ряд недостатков. Главные из них обусловлены:
— дискретностью (прерывностью) процесса прессования;
— наличием реактивных сил трения на контакте металла с контейнером.

Таким образом, вследствие неравномерности деформации и высокой энергоемкости процесса прессования ограничивается длина прессуемых изделий, снижается их качество. Применение схемы непрерывного прессования позволяет устранить эти недостатки. Данный способ принципиально отличается от предыдущих тем, что для деформации и экструдирования заготовки через отверстие матрицы используются активные силы трения. Длина заготовки при этом не ограничена.

В последние годы разрабатываются так называемые «совмещенные» процессы ОМД, которые представляют собой сочетание двух и более процессов деформирования.

Следует особо отметить важнейшую особенность совмещенного процесса ОМД: зачастую при его реализации недостатки составляющих отдельных процессов снижаются либо полностью устраняются.

Кроме того, в последнее время все большее внимание уделяется энергосберегающим технологиям, основанным на использовании для деформации активных сил трения.

Авторы данного исследования разработали совмещенный способ прокатки и прессования в равноканальной ступенчатой матрице, который по сравнению с обычным прессованием в равноканальной ступенчатой матрице снимает ограничения по размерам исходных заготовок [15]. Он представляется одним из наиболее перспективных и малоизученных в практическом плане процессов прокатки и прессования и по многим параметрам превосходит известные способы обработки металлов давлением.

Суть данного способа деформирования заключается в следующем. Предварительно нагретая до температуры начала деформирования заготовка подается к прокатным валкам. Первая пара валков за счет сил контактного трения захватывает заготовку в зев валков, а на выходе из него проталкивает заготовку через каналы равноканальной ступенчатой матрицы. После того как заготовка полностью выйдет из каналов матрицы, ее захватывает вторая пара валков, которые также за счет контактных сил трения полностью вытягивают заготовку из матрицы. Таким образом, в данном случае прессование заготовок обеспечивается контактными силами трения, возникающими на поверхности контакта металла с вращающимися валками.

Ранее проводились различные исследования данного совмещенного процесса — как теоретические [16–19], так и лабораторные (на установке с одной парой валков) [20–23]. В настоящей работе приведены результаты

исследования энергосиловых параметров, изученных в ходе разработки опытно-промышленной установки с двумя парами валков (рис. 1).

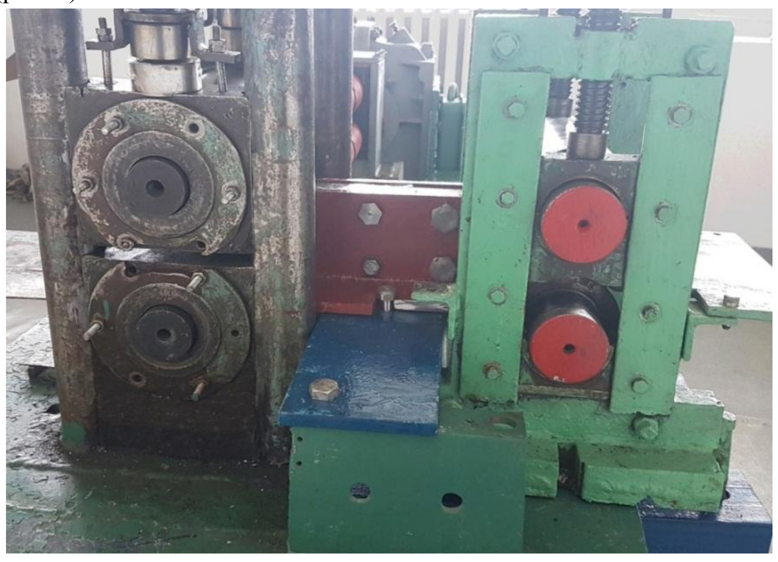


Рис. 1. Экспериментальная установка для реализации совмещенного процесса «прокатка − РКУ-прессование»

Прочностной анализ РКУ-матрицы. При реализации совмещенного процесса «прокатка — РКУ-прессование» использовалась экспериментальная установка, созданная на основе лабораторных прокатных станов ДУО-200 и ДУО-250. Их энергосиловые характеристики позволяют деформировать алюминиевые и медные сплавы в холодном состоянии.

При проектировании новой технологии деформирования на этапе создания экспериментальной установки особое место занимает прочностной анализ. Он позволяет определить стойкость и жесткость рабочего инструмента, оценить его запас прочности, что даст информацию о его долговечности. Теоретические исследования совмещенного процесса «прокатка — РКУ-прессование» были выполнены с помощью компьютерного моделирования в программе DEFORM. В результате установлено [17, 18], что самой нагружаемой деталью является матрица для прессования. Это объясняется тем, что в зоне стыка каналов возникают наиболее жесткие условия деформирования. Поэтому для проверки пригодности выбранной конструкции матрицы проводился прочностной анализ. С этой целью была построена модель матрицы с углом стыка каналов 150 градусов по размерам, представленным в [20].

При реализации совмещенного процесса целесообразно подбирать ширину заготовки таким образом, чтобы при деформировании в матрице металл не контактировал с ее боковыми стенками. Это позволит существенно снизить общее усилие противодавления со стороны матрицы. Однако полностью исключать такой случай нельзя. Поэтому в программном комплексе DEFORM была создана модель РКУ-прессования, в которой высота и ширина заготовки соответствуют высоте и ширине канала матрицы. Данный случай деформирования является предельным и почти неосуществим на практике. Поэтому, если матрица окажется достаточно прочной, она подойдет и для совмещенного процесса, условия которого существенно «мягче». В частности, высота и ширина заготовки несколько меньше высоты и ширины канала матрицы, что является необходимым условием для прохождения металла по каналу.

Начальные размеры заготовки — 10×40×90 мм. Условия и допущения, принятые при моделировании:
— материал заготовки до деформации является изотропным, в нем отсутствуют какие-либо напряжения и деформации;
— заготовка разбита на 24 000 конечных элементов, средняя длина ребра элемента —1,5 мм;
— начальная температура заготовки — 700 °С, также учитывались деформационный разогрев и теплопередача от заготовки к инструменту и в окружающую среду;
— инструмент принят как абсолютно жесткое тело;
— модель заготовки принята как упругопластическая;
— материал заготовки — AISI 1045, соответствующий стали 45;
— коэффициент трения на контакте заготовки и матрицы равен 0,1;
— скорость движения пуансона равна 10 мм/сек.

В результате расчета определялось усилие деформирования на всех элементах матрицы с целью нахождения наиболее нагруженных элементов конструкции. Наибольшие усилия возникают в направлении действия нормальных напряжений (рис. 2).

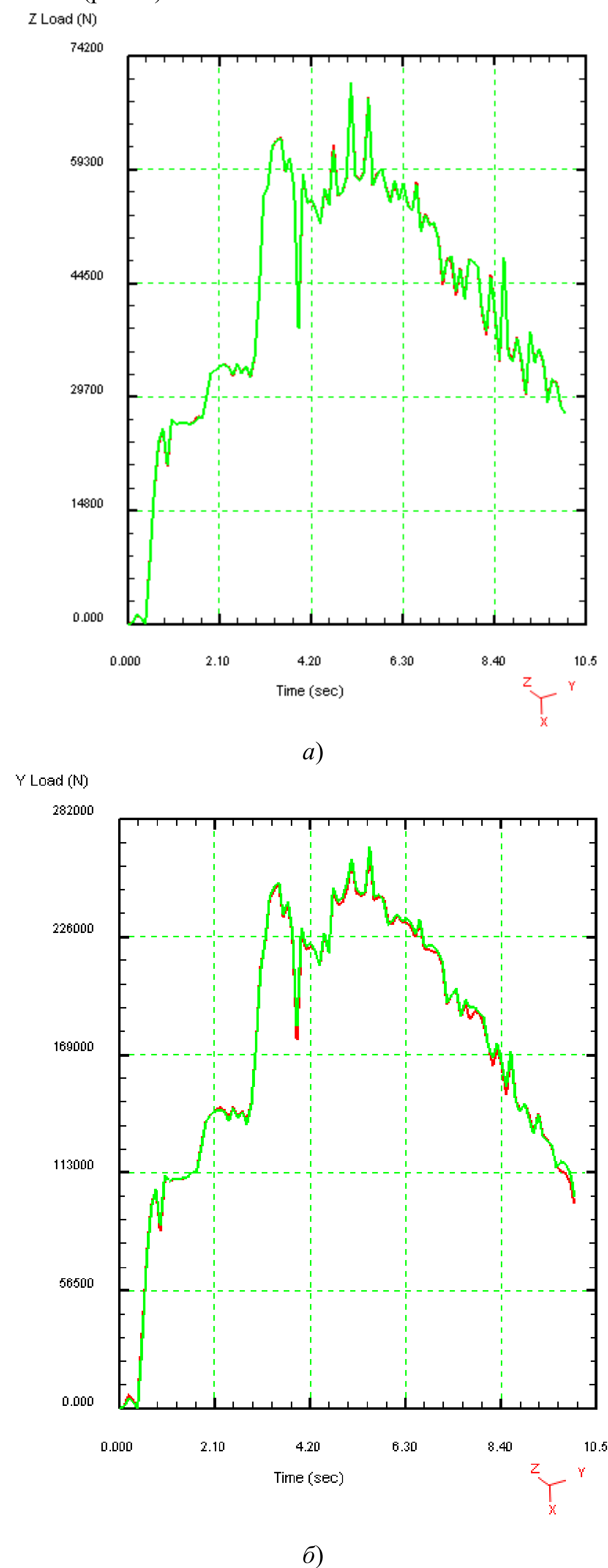


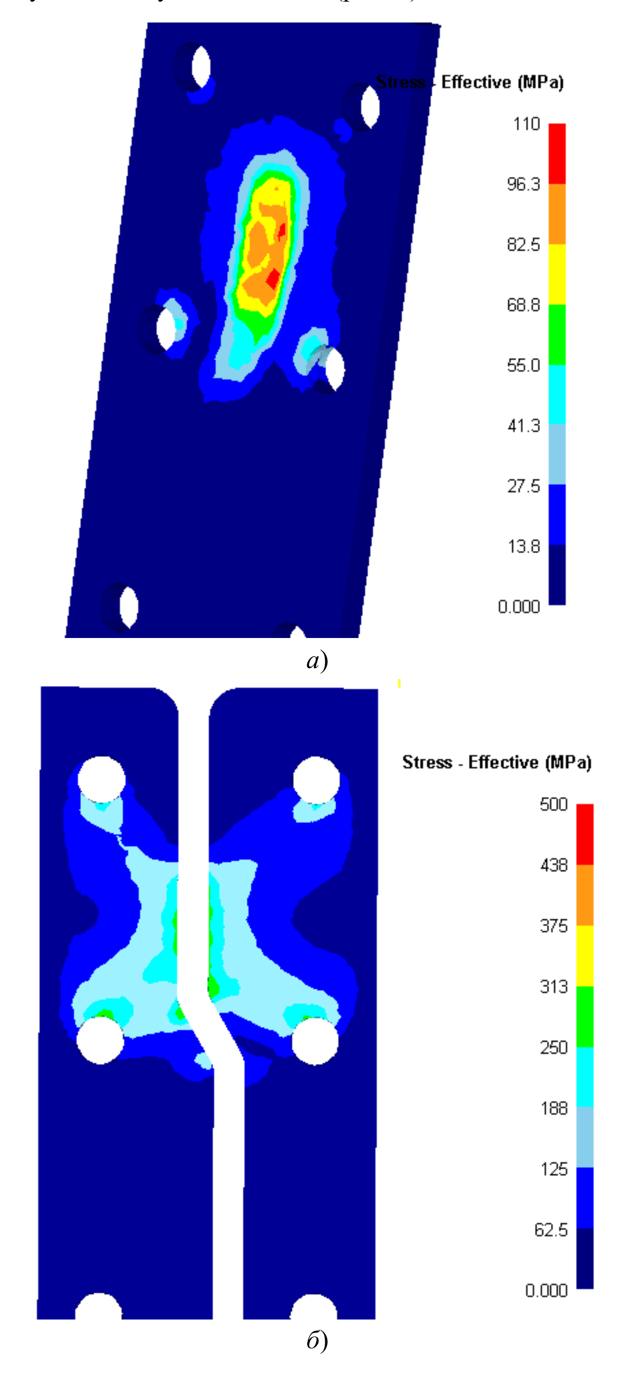
Рис. 2. Графики усилия РКУ-прессования для боковых стенок (*а*) и центральных сегментов (*б*)

Из рис. 2 видно, что самыми нагруженными элементами матрицы являются центральные сегменты. При деформировании на них возникает усилие до 260 кН, в то время как на боковых стенках оно не превышает 75 кН. На основании этих данных был проведен анализ напряжений на инструменте в программе DEFORM с

помощью специализированного модуля. Принцип данного анализа заключается в том, что абсолютно жесткие элементы модели становятся упругими телами, воспринимающими напряжение. От заготовки проводится интерполяция действующих сил на инструмент. Затем задаются места фиксации, чтобы упругие тела под действием сил не разлетались. В нашем случае местами фиксации являются кольцевые отверстия для крепежных элементов. Помимо этого в данном расчете необходимо задать материал инструмента. Для изготовления матрицы была использована инструментальная сталь 5ХВ2С. Она применяется для изготовления:

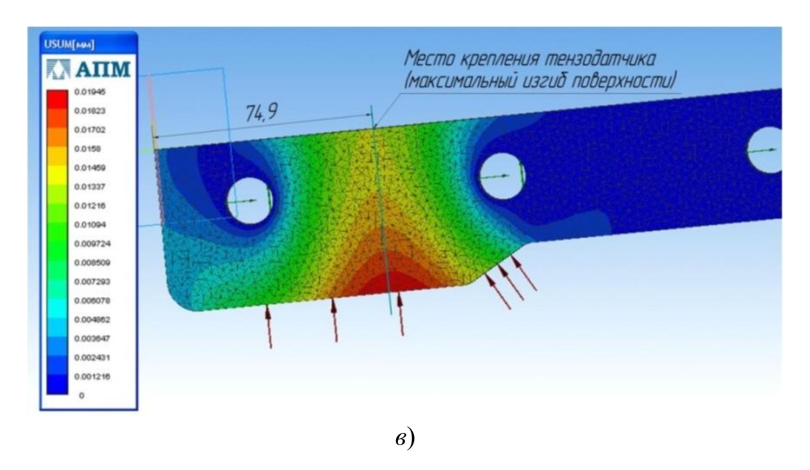
— штампов сложной формы, работающих с повышенными ударными нагрузками,
— ножей для холодной резки металла,
— резьбонакатных плашек,
— пуансонов и обжимных матриц при холодной работе.

В результате были получены следующие данные (рис. 3).



а)

б)



в)

Рис. 3. Результаты прочностного анализа: напряжение на боковых стенках (*а*); напряжение в центральных сегментах (*б*); линейное перемещение (*в*)

Из рис. 3 можно сделать следующий вывод: наиболее нагруженные зоны в центральных сегментах — это поверхностные области возле стыка каналов и дуговые зоны вокруг первых двух пар отверстий. Здесь возникает напряжение, доходящее до 250 МПа.

В областях между отверстиями напряжение находится в пределах 125÷150 МПа (рис. 3, *а*).

На боковых стенках максимальные напряжения возникают в зоне контакта с деформируемым металлом и равны 95÷100 МПа (рис. 3, *б*).

Для изучения жесткости конструкции были рассмотрены результаты расчета линейных перемещений элементов конструкции под действием упругой деформации в специализированной расчетной библиотеке «АПМ» [24]. Изучение упругой деформации показывает ее наибольшую величину в поверхностной области возле стыка каналов. Следует отметить два факта. Первый: действующие напряжения на всех элементах матрицы значительно ниже предела текучести стали 5ХВ2С. Второй: максимальное значение линейного перемещения достигает 0,019 мм (рис. 3, *в*), что пренебрежимо мало и позволяет говорить о повышенной жесткости предлагаемой конструкции. Учитывая эти два обстоятельства, можно сделать вывод о данной конструкции матрицы: она пригодна для создания экспериментальной установки совмещенного процесса «прокатка — РКУ-прессование», поскольку рассчитанного запаса прочности вполне достаточно для реализации РКУ-прессования на предельных условиях.

Лабораторные эксперименты по изучению усилий. В результате проведенного прочностного расчета определено место установки на матрице тензодатчиков для измерения усилия деформирования. Места крепления находятся на расстоянии 75 мм от переднего края центрального сегмента, где возникают максимальные линейные перемещения.

Для измерения возникающих усилий деформирования использовалось следующее оборудование:
— тензостанция ZET-017-T8 (ЗАО «ЭТМС», Россия);
— датчики усилия с тензорезисторами ТКФО1-2-200 (ЗАО «ЭТМС», Россия);
— ноутбук для управления тензостанцией и записи сигнала.

Тензостанция ZET 017-T8 производства ЗАО «ЭТМС» (г. Москва) предназначена для проведения измерений энергосиловых и иных параметров по нескольким каналам с временным разрешением записи до 20 кГц [25].

При изучении энергосиловых параметров совмещенного процесса «прокатка — РКУ-прессование» планируется исследовать усилия деформирования на стадиях прокатки в валках и прессования в матрице. Для этого необходимо установить тензорезисторы на матрицу и на месдозы прокатной клети. Суть тензометрии заключается в том, что в процессе деформации на валки и матрицу воздействуют усилия прокатки и прессования. В результате валки и матрица изгибаются. Вместе с ними деформируются тензорезисторы, прикрепленные к матрице и месдозам. Изменяется величина их электрического сопротивления. Тензостанция фиксирует это изменение и в соответствии с результатами предварительной тарировки датчиков автоматически преобразует его в график изменения усилия.

Для предварительной тарировки тензорезисторов центральный сегмент матрицы и месдоза испытывались на сжатие на гидравлической крутильно-разрывной машине МИ-40КУ. Использование крутильно-растяжной машины позволяет развивать значительные усилия (35−40 кН). При этом их значения фиксируются точно и надежно. Изменение напряженно-деформированного состояния под нагрузкой вызывает деформацию и

линейное изменение сопротивления тензорезисторов. Суть тарировки состоит в построении зависимости, связывающей электрическое напряжение в схеме и прикладываемое усилие. Эта зависимость всегда имеет строго линейный характер.

Для проведения тарировки исследуемые элементы последовательно нагружались с шагом 5 кН в диапазоне от нуля до 35 кН. Фиксировались соответствующие значения напряжения в схеме под нагрузкой и после ее снятия. В целях повышения точности выполнено три прохода по указанному диапазону − вверх, вниз, вверх (42 измерения). В результате для каждого элемента получены зависимости «усилие − перемещение» («перемещение» соответствует значению хода верхнего бойка). Данные тарировочных испытаний были статистически обработаны, и по ним получены уравнения линейной регрессии, связывающие прикладываемое к инструменту усилие (P_i, Н) с напряжением (U_i, мВ) в схеме.

Уравнение для измерения усилия прокатки имеет вид:

$$P_i = -4852{,}7U_i + 23538.$$

Коэффициент детерминации R^2 = 0,998. Стандартная ошибка измерения по результатам 42 тестов составила менее 0,2 %.

Уравнение для измерения усилия прессования имеет вид:

$$P_i = -4120{,}2U_i + 21609.$$

Коэффициент детерминации R^2 = 0,997. Стандартная ошибка измерения по результатам 42 тестов составила менее 0,3 %.

Полученные данные были занесены в программу регистрации и обработки измерений тензостанции ZET-017-T8. Это позволяет записать сигнал в виде графика усилия.

После проведения тарировочных работ матрица с тензорезистором была размещена на экспериментальной установке (рис. 4).



Рис. 4. Измерение усилия при совмещенном процессе «прокатка − РКУ-прессование»

Здесь, на месдозах первой клети также были установлены тензорезисторы для измерения усилия прокатки, которое выполнялось только на первой клети. Это ключевой параметр, согласно концепции процесса. При реализации совмещенного процесса усилие прокатки должно превышать возникающее усилие прессования.

В качестве исходного материала использован алюминиевый сплав 6063 (аналог алюминиевого деформируемого сплава АД31) при комнатной температуре. Его химический состав и механические свойства приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав и механические характеристики алюминиевого сплава 6063

<table>
<tr><td colspan="9">Массовая доля элементов, %</td></tr>
<tr><td>Si</td><td>Fe</td><td>Cu</td><td>Mn</td><td>Mg</td><td>Cr</td><td>Zn</td><td>Ti</td><td>Прочие</td></tr>
<tr><td>0,2–0,6</td><td>0,35</td><td>0,1</td><td>0,1</td><td>0,45–0,9</td><td>0,1</td><td>0,1</td><td>0,1</td><td>0,15</td></tr>
<tr><td colspan="9">Механические свойства при 20 °С</td></tr>
<tr><td colspan="2">Предел прочности, МПа</td><td colspan="3">Предел текучести, МПа</td><td colspan="2">Твердость, НВ</td><td colspan="2">Удлинение, %</td></tr>
<tr><td colspan="2">90</td><td colspan="3">48</td><td colspan="2">25</td><td colspan="2">20</td></tr>
</table>

Заготовки одинаковых размеров (15×25×450 мм) прокатывались в первой клети до толщины 9 мм. Во второй клети зазор между валками был равен 7 мм. Длину заготовки выбирали таким образом, чтобы ее передний конец захватывался второй парой валков, а задний конец в этот момент еще прокатывался в первой клети (рис. 5).

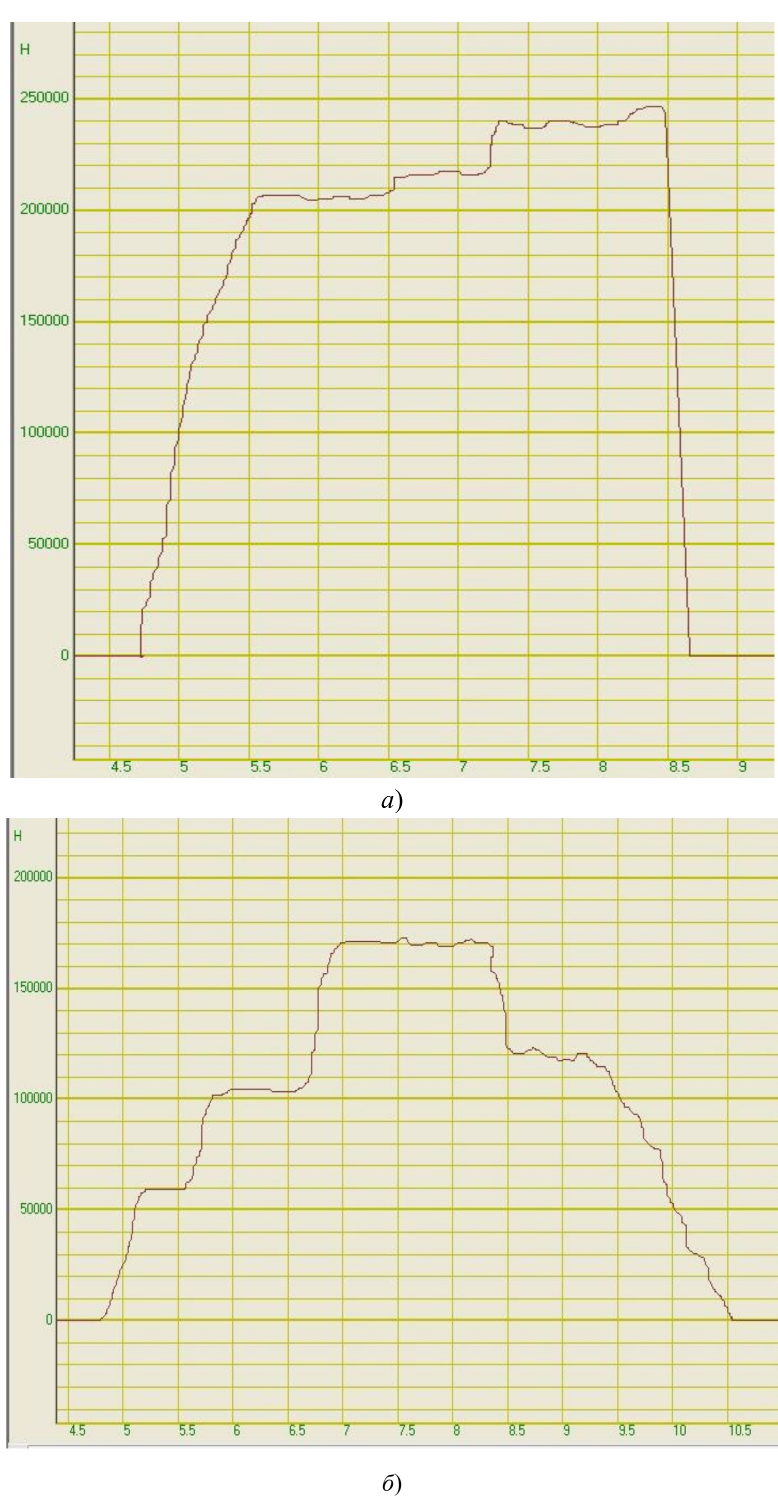


Рис. 5. Изменение усилия при деформировании алюминиевого сплава 6063: прокатка в первой клети (*а*); прессование в матрице (*б*)

Данные замеров усилий сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения усилия

	1-я стадия	2-я стадия	3-я стадия
Этап прокатки, кН	205	217	242
Этап прессования, кН	59	104	172
Разница (запас сил трения), %	247	108	40

Также была определена разница между значениями усилия прокатки и прессования. В данном случае эта разница характеризует уровень запаса активных сил трения:

$$\Delta = (\frac{P_{ПРОК}}{P_{ПРЕСС}} - 1) \cdot 100\% ,$$

где $P_{ПРОК}$ — усилие прокатки в первой клети; $P_{ПРЕСС}$ — усилие противодавления в матрице.

Сравнительный анализ значений возникающих усилий показал, что усилия прокатки на всех трех этапах превышают значения соответствующих усилий прессования. Таким образом, выполняется необходимое условие для реализации совмещенного процесса. При этом запас активных сил трения в первой клети с продвижением заготовки по каналам матрицы существенно снижается.

Выводы. Результаты исследования свидетельствуют о том, что запаса прочности матрицы вполне достаточно для реализации РКУ-прессования на предельных условиях. Следует отметить также, что усилия прокатки на всех этапах деформирования превышают усилия прессования, и таким образом выполняется необходимое условие реализации совмещенного процесса. При этом запас активных сил трения в первой клети с продвижением заготовки по каналам матрицы существенно снижается.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании экспериментальных установок, реализующих исследуемый совмещенный процесс. Тензометрический метод исследования прочностных характеристик пригоден и при использовании калиброванных валков.

Библиографический список

1. Jahedi, M. High-Pressure Double Torsion as a Severe Plastic Deformation Process: Experimental Procedure and Finite Element Modeling / M. Jahedi, M. Knezevic, M.-H. Paydar // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2015. — Vol. 24, iss. 4. — P. 1471–1482.
2. Straska, J. Evolution of microstructure and hardness in AZ31 alloy processed by high pressure torsion / J. Straska [et al.] // Materials Science and Engineering: A. — 2015. — Vol. 625. — P. 98–106.
3. Alhamidi, A. Grain refinement and high strain rate superplasticity in aluminium 2024 alloy processed by high-pressure torsion / A. Alhamidi, Z. Horita // Materials Science and Engineering: A. — 2015. — Vol. 622. — P. 139–145.
4. Valiev, R.-Z. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / R.-Z. Valiev, T.-G. Langdon // Progress in Materials Science. —2006. — Vol. 51. — P. 881–981.
5. Microstructure and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing combined with aging treatment / M.-H. Shaeri [et al.] // Materials & Design. — 2014. — Vol. 57. — P. 250–257.
6. Effect of route on tensile anisotropy in equal channel angular pressing / X. Zhang [et al.] // Materials Science and Engineering: A. — 2016. — Vol. 676. — P. 65–72.
7. Microstructure and tensile properties of Cu-Al alloys processed by ECAP and rolling at cryogenic temperature / W. Wei [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. — 2016. — Vol. 678. — P. 506–510.
8. Microstructural, texture, plastic anisotropy and superplasticity development of ZK60 alloy during equal channel angular extrusion processing / E. Mostaed [et al.] // Metallurgia Italiana. — 2015. — Iss. 11–12. — P. 5–12.
9. Inhomogeneity in strain, microstructure and mechanical properties of AA1050 alloy during twist extrusion / F.-J. Kalahroudi [et al.] // Materials Science and Engineering: A. — 2016. — Vol. 667. — P. 349–357.
10. Finite element analysis of the plastic deformation in tandem process of simple shear extrusion and twist extrusion / J.—G. Kim [et al.] // Materials & Design. — 2015. — Vol. 83. — P. 858–865.
11. Bar Bahadori, S.-R. Comparison of microstructure and mechanical properties of pure copper processed by twist extrusion and equal channel angular Pressing / S.-R. Bar Bahadori, K. Dehghani, S.-A.-A.-A. Mousavi // Materials Letters. — 2015. — Vol. 152. — P. 48–52.

12. Modeling and Characterization of Texture Evolution in Twist Extrusion / M. I. Latypov [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions: A. — 2016. — Vol. 47A, iss. 3. — P. 1248–1260.

13. Устройство для обработки металлов давлением : патент 2181314 Рос. Федерация : 7 B21D25/02 / Г. И. Рааб [и др.] ; Уфимский государственный авиационный технический университет. — № 2000115099/02 ; заявл. 09.06.2000 ; опубл. 20.04.2002, Бюл. № 16.

14. Naizabekov, A. B. Change in Copper Microstructure and Mechanical Properties with Deformation in an Equal Channel Stepped Die / A. B. Naizabekov, S. N. Lezhnev, I. E. Volokitina // Metal Science And Heat Treatment. — 2015. — Vol. 57, iss. 5–6. — P. 254–260.

15. Устройство для непрерывного прессования металла : патент 25863 Республика Казахстан : B21J 5/00 / А. Б. Найзабеков, С. Н. Лежнев, Е. А. Панин ; Карагандинский государственный индустриальный университет. — № 2011/0762.1 ; заявл. 02.07.11; опубл. 16.07.12 , Бюл. № 7. — 6 с.

16. Theoretical grounds of the combined «rolling — equal — channel step pressing» process / A. Naizabekov [et al.] // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. — 2016. — Vol. 51, iss. 5. — P. 594–602.

17. Найзабеков, А. Б. Моделирование совмещенного процесса «прокатка — прессование» с использованием равноканальной ступенчатой матрицы / А. Б. Найзабеков, С. Н. Лежнев, Е. А. Панин // Труды Университета. — 2008. — № 3. — С. 16–19.

18. Lezhnev, S. Investigation of the Influence of Geometric and Technological Factors on the Stress — Strain State of Metal in the Implementation of the Combined Rolling —Pressing Process / S. Lezhnev, E. Panin // Advanced Materials Research. — 2014. — Vol. 936. — P. 1918–1924.

19. Evaluation of the effectiveness of the use of horizontal and vertical rolls in the «Rolling — pressing» process on the basis of the stress — strain state studying / S. Lezhnev [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2017. — Vol. 179, № 012047. — 5 p.

20. Study of broadening in a combined process «rolling — pressing» using an equal — channel step die / A. Naizabekov [et al.] // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. — 2015. — Vol. 50, iss. 3. — P. 308–313.

21. Lezhnev, S. Research of combined process «Rolling — pressing» influence on the microstructure and mechanical properties of aluminium / S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina // Advanced Materials Research. — 2013. — Vol. 814. — P. 68–75.

22. Influence of Combined Process «Rolling — pressing» on Microstructure and Mechanical Properties of Copper / A. Naizabekov [et al.] // Procedia Engineering. — 2014. — Vol. 81. — P. 1499–1504.

23. The Role of Preliminary Heat Treatment in the Formation of Ultrafine — Grained Structure in the Implementation of the Combined Process «Rolling — Equal Channel Angular Pressing» / A. Naizabekov [et al.] // Materials Science Forum. — 2016. — Vol. 879. — P. 1093–1098.

24. Система прочностного анализа APM FEM для КОМПАС-3D [Электронный ресурс] / ООО Научно-технический центр «АПМ». — Режим доступа: http://apm.ru/produkti/programmnie_kompleksi/APM_FEM (дата обращения: 14.07.18).

25. Тензометрическая станция ZET 017-T8 [Электронный ресурс] / Предприятие «Электронные технологии и метрологические системы» (компания ZETLAB). — Режим доступа: https://zetlab.com/shop/izmeritelnoe-oborudovanie/tenzostantsii/tenzostanciya-zet-017-t8. (дата обращения: 14.07.18).

Поступила в редакцию 09.02 .2018
Сдана в редакцию 10.02.2018
Запланирована в номер 21.06.2018

Received 09.02 .2018
Submitted 10.02.2018
Scheduled in the issue 21.06.2018

Об авторах:

Найзабеков Абдрахман Батырбекович,
ректор Рудненского индустриального института (Республика Казахстан, 111500, Костанайская обл., Рудный, ул. 50 лет Октября 38), доктор технических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8517-3482
naizabekov57@mail.ru

Authors:

Naizabekov, Abdrakhman B.,
rector, Rudny Industrial Institute (38, 50 let Oktyabrya St., Rudny, Kostanay region, 111500, Republic of Kazakhstan), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8517-3482
naizabekov57@mail.ru

Лежнев Сергей Николаевич,
доцент кафедры «Металлургия и горное дело» Рудненского индустриального института (Республика Казахстан, 111500, Костанайская обл., Рудный, ул. 50 лет Октября 38), кандидат технических наук,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1737-9825
sergey_legnev@mail.ru

Lezhnev, Sergey N.,
associate professor of the Metallurgical Engineering and Mining Department, Rudny Industrial Institute (38, 50 let Oktyabrya St., Rudny, Kostanay region, 111500, Republic of Kazakhstan), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1737-9825
sergey_legnev@mail.ru

Койнов Тончо Атанасов,
профессор «Физическая металлургия и тепловые агрегаты», Университет химической технологии и металлургии (Республика Болгария, София, 1756, Бульвар Климент Охридски, 8), доктор технических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9577-3732
toni309@koinov.com

Koinov, Toncho A.,
professor of the Physical Metallurgy and Thermal Generating Units Department, University of Chemical Technology and Metallurgy(8, Kliment Ohridsky Blvd., Sofia, 1756, Bulgaria), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9577-3732
toni309@koinov.com

Панин Евгений Александрович,
старший преподаватель кафедры «Обработка металлов давлением», Карагандинского государственного индустриального университета (Республика Казахстан, 101400, Карагандинская обл., Темиртау, пр. Республики 30),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6830-0630
cooper802@mail.ru

Panin, Evgeny A.,
senior lecturer of the Metal Forming Department, Karaganda State Industrial University (30, Republic Ave., Temirtau, Karaganda region, 101400, Republic of Kazakhstan),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6830-0630
cooper802@mail.ru